Monte Carlo 모의 기법을 이용한 저수지 간 추가-감축 용수 공급량 산정

Estimation of Supplement-Reduction Amounts of Water Supply in a Reservoir System Operation Using a Monte Carlo Simulation

진영규* · 이상호** · 정택문*** · 강신욱****

Jin, Youngkyu*, Lee, Sangho**, Jeong, Taekmun***, and Kang, Shinuk****

Abstract

One can compensate users for a water supply shortage from a reservoir by supplying supplemental water from another reservoir. Such an operation may be a reservoir system operation. Specific supplement-reduction quantities of water, derived from an optimization method, are bound by the reservoir inflows and the objective function used for the derivation. Thus, they do not always provide proper reservoir simulation results for random future inflows to reservoirs. If reasonable supplement-reduction water supply quantities are known as ranges, instead of as fixed values, the water supply operations of reservoirs may be more stable. The purpose of this study is to determine, via a Monte Carlo simulation, the ranges of supplement-reduction quantities of water supply needed from the major multi-purpose dams in the Nakdong River basin to cope with droughts. The reservoir system simulation, a model of the Nakdong River basin, was developed using GoldSim. The simulation period was set from 2017 to 2018, when the drought was severe at the Andong-Imha and Hapcheon dams. When reservoirs were simulated independently during the test period, and current water supply adjustment standards were applied, a perfect failure period of water supply from the Hapcheon dam occurred for more than five months. To mitigate that, supplemental releases were provided from the Namgang dam and the releases from the Hapcheon dam were reduced. Performing the Monte Carlo simulation produced the appropriate range of supplement-reduction releases, with a range of 3.35 to 4.42 m³/s. Using a range of supplement-reduction releases for the reservoir system operation is considered more effective for reservoir operations than using fixed values.

Key words : Reservoir System Simulation, Water Supply, Adjustment Standard, Monte Carlo Simulation, Drought

요 지

물 공급을 위한 저수지군의 연계 운영을, 한 저수지의 물 공급량 부족을 다른 저수지의 물 추가 공급으로 보완하는 방식으로 수행할 수 있다. 최적화 기법으로 유도한 추가-감축 용수 공급량은 사용된 저수지 유입량 시계열과 목적함수에 구속되므로, 무작위의 미래 유입량에 대하여 항상 적절한 저수지 운영결과를 도출한다고 할 수 없다. 만일 저수지 연계 운영의 목표에 부합하는 추가-감축 용수 공급량을 특정한 값이 아닌 범위로 알 수 있으면, 보다 안정적으로 물을 공급할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 Monte Carlo 모의를 이용하여 낙동강 주요 다목적 댐 군의 가뭄 대응 추가-감축 용수 공급량의 범위를 결정하였다. 저수지군 연계 모의 운영 모형으로서 GoldSim으로 자체 개발한 낙동강 주요 다목적 댐 군 이수목적 연계 모의 운영 모형을 사용하였다. 모의 운영 기간은 안동-임하댐과 합천댐에 가뭄이 극심했던 2017년부터 2018년까지로 하였다. 모의 운영 기간에 대하여 현행 용수공급 조정기준으로 저수지들을 독립 운영하였을 경우, 합천댐에서 용수 공급 완전 실패 기간이 5개월 이상 발생하였다. 이를 완화하기 위해 남강댐에서 추가로 방류하고 합천댐에서 감축하여 방류하였다. 여기서, Monte Carlo 방법으로 추가-감축 방류량의 적정 범위를 결정하였으며, 그 범위는 3.35 ~ 4.42 m³/s이었다. 범위로 주어진 방류량 추가-감축의 연계 운영 방안은 단일의 최적 운영 규칙보다 실제 저수지 운영에서 효용성이 크다고 판단된다.

핵심용어 : 저수지군 모의 운영, 용수공급, 조정기준, Monte Carlo 모의, 가뭄

*정회원, 부경대학교 공과대학 토목공학과 박사수료(E-mail: accvn75@gmail.com)

Member, Ph.D. candidate, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

**교신저자, 정회원, 부경대학교 공과대학 토목공학과 교수(Tel: +82-51-629-6076, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

***부경대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail: jtmooon07@naver.com)

Master course, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

****정회원, K-water연구원 책임연구원(E-mail: sukang@kwater.or.kr)

Member, Principal researcher, K-water Institute, K-water

1. 서 론

우리나라는 과거 장기적인 가뭄으로 인하여 댐 내 저수량이 줄어 용수 공급에 차질이 생기는 경우가 많았다. 이에 최근 K-water에서는 가뭄이 발생할 경우, 댐 하류의 용수가 부족한 만큼 공급하는 부족분 공급 방식으로 댐에서 용수를 공급하고 있다. 가뭄의 경우에는 홍수와 달리 넓은 지역에서 장기적으로 발생하기 때문에 가뭄 기간 내에 하나의 저수지 단독으로 대응하기 어렵다. 또한, 우리나라는 상당량의 용수 공급이 댐에서 이루어지고 있기 때문에, 가뭄 시 용수 공급의 안정성을 확보하기 위해서는 댐에서 장기적인 용수 공급 계획이 수립되어야 될 뿐만 아니라 수계 내 댐 군 연계 운영을 통하여 대응 방안을 수립할 필요가 있다.

가뭄 대응을 위한 저수지 운영과 관련된 과거의 연구들은 대부분 최적의 저수지 운영 규칙을 찾거나 연계 운영 방안을 결정하는 연구들이다. 이와 같은 연구들은 과거 유입량을 활용하여 저수지군 최적 연계 운영 방안 및 저수지 운영 규칙을 선형계획법, 비선형계획법, 동적계획법, 휴리스틱 방법 등으로 결정하는 내용들이다(Shih and Revelle, 1995; Neelakantan and Pundarikanthan, 1999; Wan et al., 2016). 국내 저수지에 관한 사례를 보면, Kang et al. (2017)은 안동댐과 임하댐의 월별 용수 감량공급 기준 저수량을 결정하기 위해 차원 변화 탐색 기법을 이용하였다. Jin and Lee (2017)는 차원변화 탐색 기법을 이용하여 댐 하류 제어지점의 물 공급 부족을 완화하기 위한 상류 댐의 추가 방류 기준을 탐색하였다. Jin and Lee (2019)는 혼합정수계획법을 이용하여 가용수량 및 저수량 기준의 4단계 이산화 용수 감량공급 기준곡선을 결정한 후, 각각의 기준곡선으로 저수지를 모의 운영한 결과를 비교 평가하였다. 국외 사례를 보면, Tu et al. (2003)는 저수지군의 용수 감량공급 실행 저수량들을 결정하기 위해 혼합정수계획법을 이용하였다. 또한, 후속연구인 Tu et al. (2008)은 최적화 수식 내에 용수의 적정 감량비율을 찾는 식을 포함하여, 용수의 감량공급 실행 시점과 감량공급 양을 결정하는 수학적 모형을 제시하였다. Adeloeye et al. (2016)은 스쿼트 픽 알고리즘과 유전자 알고리즘을 결합한 최적화 모형을 이용하여 단일 저수지의 감량공급 기준곡선을 결정하였다. 또한, 유역 유출 모형에 강수량을 증감시킨 시계열을 입력하여 유출량을 얻은 후, 유입량 시계열과 결정된 저수지 운영률을 이용하여 강수량의 변동에 따른 용수공급 안정성과 관련된 여러 지표들을 산정하여 미래 기후변화에 대한 영향을 분석하였다. Spiliotis et al. (2016)은 휴리스틱 기법 중 하나인 PSO (particle swarm optimization) 이용하여 월별 최적 용수 감량공급 실행 저수량 및 용수 감량공급 비율을 탐색하였다.

위의 국·내외 최적화 기법 적용 사례 중 중요한 문제점이 있다. 즉, Jin and Lee (2017)의 결과를 보면 용수 공급 완전 실패가 발생하는 기간이 있다. 본 논문은 위의 문제점을

해결하고자 다음과 같은 방법을 적용하였다.

Monte Carlo 모의 방법은 문제에 대하여 모형의 입력자료를 선정한 범위 내에서 반복적으로 무작위 샘플링하여 여러 수치해를 도출하는 종합 분석 기법이다. 본 논문에서는 Monte Carlo 모의 방법을 이용하여 가뭄 대응을 위한 낙동강 주요 다목적 댐 군(안동-임하댐, 합천댐, 남강댐)의 저수지 간 추가-감축 용수 공급량의 적정 범위를 찾는 방안을 제시하고자 한다. Monte Carlo 모의 방법을 이용한 적정 추가-감축 용수 공급량 범위 산정 방안은 최적화 기법과 다르게 용수 공급 완전 실패를 야기한 추가-감축 용수 공급량 시나리오를 배제함으로써 가용해의 범위를 도출할 수 있다. 또한, 가용해로부터 모의된 여러 저수량 시계열, 방류량 시계열 등은 저수지 운영 시 의사결정에 필요한 자료들로서 한 번의 모의로 쉽게 출력할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 활용한 저수지군 모의 운영 프로그램은 GoldSim을 이용하여 자체 개발한 낙동강 주요 다목적 댐 군 이수목적 연계 모의 운영 모형(reservoir system simulation model-Nakdong; RSSM-ND)이다.

2. 연구방법

2.1 용수공급 조정기준

우리나라에서는 가뭄으로 인한 국가 재난예방을 위해 다목적 댐 및 용수 공급 전용 댐을 대상으로 댐의 용수 공급 능력을 확보하는 기준인 용수공급 조정기준을 마련해 놓고 있다. 용수공급 조정기준에서 가뭄 단계는 4단계(관심, 주의, 경계, 심각)로 제시하고 있으며, 가뭄 단계에 상응하는 순 단위의 기준 저수량 및 용수 감량공급량을 제시하고 있다(Lee, 2018). Fig. 1은 가뭄 단계에 따른 용수의 사용 목적별 공급량과 가뭄 단계의 격상과 해제 기준에 대해 제시한 것이다. 생·공용수와 농업용수의 경우, 가뭄 단계가 심화됨에 따라 계약 공급량, 실사용량 순으로 감량하여 공급한다. 여기서, 계약 공급량은 댐에서 지자체 등에 계약한 공급량이고, 실사용량은 예년에 사용처에서 취수한 양을 의미한다. 하천유지용수는 관심단계까지는 계획 공급량을 공급하고, 관심단계보다 심각한 가뭄 단계에서는 전량 공급하지 않는다(K-water, 2018).

용수공급 조정기준에서 가뭄 단계는 저수량이 줄어들에 따라 단계적으로 격상이 가능하나, 심화된 가뭄 단계는 단계적으로 회복할 수 없고 심화된 가뭄 단계를 유지하다가 정상 환원 수위에 해당하는 저수량이 확보되었을 때 정상 단계로 회복한다. 이와 같은 저수지 운영 방법을 본 논문에서는 ‘회복 수위를 적용한 저수지 운영 방법’이라 제시하고자 한다.

2.2 GoldSim을 이용한 낙동강 주요 다목적댐 연계 모의 운영 모형(RSSM-ND) 개발

RSSM-ND는 객체 지향형 프로그래밍 방식의 GoldSim을

Fig. 1. Rationing Strategy of Water Supply

이용하여 개발되었으며, 사용자에게 매우 편리한 사용자 편의 환경을 제공한다. 또한 사용자가 원하는 결과 데이터를 지정하여 프로그램 수행과 동시에 확인이 가능하다는 장점이 있다(Jin et al., 2017).

RSSM-ND는 가뭄 대응을 위한 낙동강 주요 다목적 댐 군(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐)의 이수 목적 연계 모의 운영 프로그램이다. RSSM-ND의 목적은 수계 내 주요 다목적 댐 군 모의 운영을 통해 한 해 및 장기 운영 계획을 수립하고, 적정 연계 운영 방안에 대해 탐색하는 것에 있다. 또한, 과거 댐 군 운영 실적에 대한 평가의 목적도 포함된다.

RSSM-ND에서 댐 모의 운영 지배방정식은 저수지 연속 방정식이며, 모의 시 방류량을 결정하는 조건으로 용수공급 조정기준과 회복수위를 적용하였다. RSSM-ND에서 댐 간 연계 운영 방식은 하나의 댐에서 계획공급량보다 적은 양을 공급하게 하면, 타 댐에서 그 부족분만큼 추가 공급하는 것이다. 예를 들어, 합천댐에서 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 부족하게 공급하면, 남강댐에서 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 추가 공급한다.

RSSM-ND의 입력화면은 Fig. 2의 (a) 공급량, (b) 유입량, (c) 모의 조건이며, 모의 결과 확인 화면은 Fig. 2의 (d)이다. RSSM-ND에서 입력자료 중 공급량은 댐의 월별 기본계획공급량, 생·공용수 계약량, 생·공용수와 농업용수의 실사용량이다. 모의 운영에 필요한 유입량은 과거 유입량 시계열, 월 평균 유입량, 월 평년 유입량, 가뭄 빈도 유입량 중 선택적으로 입력이 가능하다. 저수지 모의 운영 조건에는 각 댐의 제원을 입력할 수 있다. 또한, 심각단계에서 생·공용수의 감량 비율과 경계단계 이하에서 농업용수의 감량비율, 순간위의 감량공급 기준 저수량을 입력할 수 있다. RSSM-ND의 결과 화면에서는 용수 공급 부족 기간 및 용수 공급 부족량을 수치로 바로 확인할 수 있으며, 모의 결과에 대한

그래프도 확인할 수 있다.

2.3 Monte Carlo 모의 방법

Monte Carlo 모의는 확률분포에 대한 난수를 사용해 많은 양의 모의 결과를 종합하여 최적해를 근사적으로 도출해내는 통계학적 분석법이다. Monte Carlo 모의 방법의 특징은 근사적으로 도출된 결과를 사용자가 직접 선택하여 분석하는데 용이하다. 또한, 무작위 표본 추출에 대한 반복 시행 횟수를 늘리면 분석결과의 정확성도 기대할 수 있다. Monte Carlo 모의 방법은 컴퓨터를 통해 단시간 내에 다수의 모의를 진행하고 그에 따른 통계적 특성을 지닌 결론을 보여준다. 각 실험에서 입력변수 $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 를 입력하면 출력변수 Y 는 입력된 변수의 함수인 $Y = g(X_n)$ 의 표본들을 통해 통계적인 분석을 할 수 있다.

본 연구에서는 Monte Carlo 모의 방법을 댐 군 연계 모의 운영에서 적정 추가-감축 용수 공급량의 범위를 결정하는데 이용하였다. 추가-감축 용수 공급량의 범위에서 최댓값은 추가 방류를 하는 저수지의 용수 공급 완전 실패가 발생하지 않는 한도 내의 최댓값을 의미하며, 최솟값은 감축 방류를 하는 저수지의 용수 공급 완전 실패가 발생하지 않는 한도 내의 최솟값을 의미한다. Monte Carlo 모의 방법을 이용 시, 적용한 분포는 균등 분포이며, 모의 발생한 경우의 수는 1,000 개로 하였다.

3. 연구결과

3.1 저수지의 독립운영 결과

연계 운영할 저수지를 선정하기 위해 RSSM-ND모형의 저수지 간 추가-감축 용수 공급량을 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정하여

(a) Setting up the water supply

(b) Setting up the inflow time series

(c) Setting up the reservoir simulation criteria

(d) Display of the simulation results

Fig. 2. Graphic User Interface of the RSSM-ND

독립 모의 운영을 실행하였다. 모의 기간은 최근 안동-임하댐과 합천댐에서 극심한 가뭄을 보였던 2017년과 2018년으로 선정하였다. Fig. 3은 RSSM-ND로 모의한 저수량과 가뭄단계, 용수공급량의 시계열 그림이다. (a)는 안동-임하댐의 저수량 시계열 그림으로 검은 실선이 저수량이고, 그 외 각 선의 의미는 위에서부터 저수지의 계획 홍수위 저수량과 홍수기 제한수위가 포함된 상시 만수위 저수량, 정상 환원 저수량, 관심단계 저수량, 주의단계 저수량, 경계단계 저수량, 심각단계 저수량, 저수위 저수량이다. (b)는 안동-임하댐의 가뭄단계 시계열 그림으로 1은 정상단계, 2는 관심단계, 3은 주의단계, 4는 경계단계, 5는 심각단계, 6은 공급불가를 의미한다. (c)는 안동-임하댐의 용수공급량 시계열 그림으로 기본계획공급량과 모의 공급량의 확인이 가능하다. (d)는 합천댐의 저수량 시계열 그림이고, (e)는 합천댐의 가뭄단계 시계열 그림, (f)는 합천댐의 용수공급

량 시계열 그림이다. (g)는 남강댐의 저수량 시계열 그림이다. 남강댐은 용수공급 조정기준의 적용에서 제외되었기 때문에 가뭄단계 별 저수량이 없다. (h)는 남강댐의 용수공급량 시계열 그림이다.

모의한 결과 안동-임하댐의 경우 2017년 5월부터 관심단계가 적용되지만 2017년 8월 중순경 저수량을 회복한 뒤 정상단계와 관심단계를 오가며 저수량을 유지하였다. 합천댐은 2017년 3월부터 주의단계가 적용되며 2017년 7월부터 12월까지 용수 공급 완전 실패 기간이 발생했고, 일시적으로 회복된 후 다시 경계단계까지 심화되었다. 남강댐의 저수량 모의 결과를 분석하면 가뭄으로 인해 저수량이 감소하지만 연계 운영 시 추가방류를 할 수 있을 만큼 용수를 보유하고 있다고 판단하였다. 이에 다음 절에서는 합천댐의 용수 공급 완전 실패 기간을 해소하기 위해 남강댐과 합천댐을 연계 운영한 결과를 제시하였다.

Fig. 3. Independent Reservoir Simulation Results

3.2 Monte Carlo 모의 방법을 이용한 적정 추가-감축 방류량 범위 산정

Monte Carlo 모의 방법을 사용하기 위해 설정한 변수는 남강댐의 추가 용수 공급량이고, 추가 용수 공급량의 초기범위는 최솟값은 $0 \text{ m}^3/\text{s}$, 최댓값은 감축방류를 실행하는 댐의 기본계획공급량이 가장 작은 달(月)의 50 %인 $9 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정하였다. 설정한 범위 내에서 무작위 표본 추출한 확률 분포는 균등 분포로 하였으며, 무작위 표본 추출한 표본의 개수는 1,000 개이다. Monte Carlo 모의 방법을 이용하여 다수의 결과를 확보하고, 사용자가 결과를 분석하여 다음 모의 시 사용할 범위를 다시 선정하고, 결과를 도출하는 방식의 시행

착오법을 이용해 모의 운영을 실행하였다.

모의 결과는 모의기간을 따라 남강댐의 추가 용수 공급량 별로 1,000 개가 도출된다. 합천댐과 남강댐의 용수공급량 모의 결과를 남강댐의 추가 용수 공급량 별로 분석하여 합천댐과 남강댐의 용수공급의 실패가 없는 추가 용수 공급량의 구간을 도출하였다. 합천댐의 용수공급 실패가 없는 구간 중 최솟값의 추가 용수 공급량을 적정 범위의 최솟값으로 결정하고, 남강댐의 용수공급 실패가 없는 구간 중 최댓값의 추가 용수 공급량을 적정 범위의 최댓값으로 결정하였다.

Table 1에 RSSM-ND의 모의 운영 시 사용한 추가-감축 용수 공급량의 범위를 정리하였다. 초기에 선정한 범위를

이용한 1차 시도의 모의 결과는 합천댐과 남강댐에서 용수공급 실패 구간이 발생하였다. 적정 추가-감축 용수 공급량 산정 방법을 이용해 결과를 도출해 2차 시도의 범위를 산정하였고, 2차 시도의 모의 결과는 용수공급 실패 구간이 제거되어 적정 추가-감축 용수 공급량 범위라고 판단하였다. Fig. 4는 1차 시도의 모의결과 그림이고, Fig. 5는 2차 시도의 모의 결과 그림이다. 그림에서 실선은 모의 결과의 평균을 의미하고, 실선 주변의 분포는 일(日) 단위의 모의 결과를 오름차순으로 정리하여 5 %마다 색을 변경하여 나타낸 것이다. 어두운 색일수록 평균에 가까운 값을 의미한다. (a)는

합천댐의 저수량 모의 결과 그림이다. (b)는 합천댐의 가뭄단계 시계열 모의 결과 그림이고, (c)는 합천댐의 용수공급량의 모의 결과 그림이다. (d)는 남강댐의 저수량 모의 결과 그림이고, (e)는 남강댐의 용수공급량 모의 결과 그림이다.

Figs. 4와 5를 비교하면 Fig. 5의 결과가 Fig. 4에 비해 모든 그림에서 범위가 줄어들었음을 확인할 수 있다. 합천댐의 가뭄단계인 Figs. 4와 5의 그림 (b)를 비교해보면, Fig. 5의 그림 (b)에서 용수공급불가 단계(6)가 없어진 것을 확인할 수 있다. 이는 남강댐에서 3.35 m³/s 이상의 추가 용수공급을 하였기 때문에 합천댐의 용수공급불가 기간이 없어

Table 1. Range of Additional Discharge of Namgang Dam Applied to Simulation

Number of trial	Additional amount of water supply of Namgang dam (m ³ /s)	Reduction amount of water supply of Hapcheon dam (m ³ /s)
First	0 ~ 9	0 ~ 9
Second	3.35 ~ 4.42	3.35 ~ 4.42

Fig. 4. Reservoir System Simulation Results: First Trial

Fig. 5. Reservoir System Simulation Results: Second Trial

진 것이다. 또한, Fig. 4의 그림 (e)를 보면, 남강댐에서 용수 공급을 하지 않은 기간이 발생하는데, 이는 남강댐에서 $4.42 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상의 과도한 추가 방류로 인해 나타난 것이다. Fig. 5의 그림 (b)에서 가뭄 단계가 심화되는 가뭄 초기 단계에서는 추가-감축 용수 공급량이 변하더라도 가뭄 단계 변화 시기의 차이가 작으나, 가뭄 말기에는 추가-감축 용수 공급량이 변함에 따라 가뭄 단계가 큰 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 합천댐의 감축 용수 공급량이 $3.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 가까울수록 장기적으로 심각 단계(5)가 유지되고, $4.42 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 가까울수록 상대적으로 심각 단계가 짧게 유지되는 것을 의미한다. 모의 기간에 대하여 선정된 추가-감축 용수 공급량 범위의 최댓값과 최솟값은 용수 공급 완전 실패를 피하기 위한 임계값이며, 이들 값에 근사한 값을 사용할 경우 용수 공급 실패에 대한 위험 부담이 커질 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 Monte Carlo 모의 방법을 이용하여 합천댐과

남강댐간의 연계운영 시 감축 및 추가 용수 공급량의 범위를 선정하는 방안을 제시하고 모의운동을 실시하였다. 저수지 군 모의 운영을 위해 사용한 저수지 모의 운영 모형은 GoldSim으로 개발된 RSSM-ND이다. RSSM-ND는 현행 용수공급 조정기준을 적용해 저수지들의 모의 운영을 진행할 수 있도록 구성되었다. 모의운동을 실시한 기간은 2017년 1월부터 2018년 12월까지 총 2년으로 최근 가장 극심한 가뭄기간을 선정하여 모의를 진행하였다.

연계 운영할 저수지는 독립 운영을 통해 장기간의 용수 공급 완전 실패가 나타난 합천댐과, 모의 기간 내 저수량의 여유가 확인된 남강댐으로 선정하였다. 모의 기간에 대해 낙동강 주요 다목적 댐 군 연계 모의 운영 시 남강댐의 추가 방류, 합천댐의 감축 방류의 범위는 Monte Carlo 모의 방법의 반복 적용으로 결정하였다. 그 결과 남강댐과 합천댐의 추가-감축 용수 공급량의 범위는 $3.35 \sim 4.42 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 결정되었다.

Monte Carlo 모의 방법을 이용한 저수지군 연계 운영 방안은, 저수지의 용수공급 완전 실패를 배제하는 추가-감축

용수 공급량의 범위를 용이하게 결정할 수 있을 뿐만 아니라, 산정된 추가 용수 공급량의 범위 내 변동에 따른 저수량 및 방류량, 가뭄 단계의 거동도 파악 가능하다. 또한 이 방안은 수많은 모의 결과를 신속하고 종합적으로 확인할 수 있도록 하므로, 저수지 연계 운영을 위한 추가-감축 용수 공급량의 범위를 현실적이고 저수지 운영 목표에 부합하도록 결정하는데 기여할 수 있다. 방류량의 범위에서 특정 값을 선택하는 문제는 발전량 증대나 가뭄 대비 용수 공급 자체 등 현실 상황에 의하여 좌우될 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행 되었음(과제번호 83078).

References

Adeloye, A.J., Soundharajan, B.S., Ojha, C.S.P., and Remesan, R. (2016). Effect of hedging-integrated rule curves on the performance of the Pong Reservoir (India) during scenario-neutral climate change perturbations. *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 2, pp. 445-470.

Jin, Y., Lee, S., and Jang, S. (2017). Introduction to graphical user interface the simulation operating model of dam using GoldSim. *Water for Future*, Vol. 50, No. 12, pp. 49-53

Jin, Y., and Lee, S. (2017). An additional water supply method from upstream dams to lessen water supply shortage at downstream control points using a heuristic method. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 507-514.

Jin, Y., and Lee, S. (2019). Comparative effectiveness of reservoir operation applying hedging rules based on available water and beginning storage to cope with droughts. *Water Resources Management*, Vol. 33, No. 5, pp. 1897-1911.

Kang, S., Lee, S., and Kang, T. (2017). Development and application of storage-zone decision method for

long-term reservoir operation using the dynamically dimensioned search algorithm. *Water Resources Management*, Vol. 31, No. 1, pp. 219-232.

K-water. (2018). *Practical manual of dam operation*.

Lee, D. (2018). *Water supply adjustment guideline for single-purpose dam against drought*. Master's thesis, Kyungpook National University.

Neelakantan, T.R., and Pundarikanthan, N.V. (1999). Hedging rule optimization for water supply reservoirs system. *Water Resources Management*, Vol. 13, No. 6, pp. 409-426.

Shih, J.S., and ReVelle, C.S. (1995). Water supply operations during drought: A discrete hedging rule. *European Journal of Operational Research*, Vol. 82, No. 1, pp. 163-175.

Spiliotis, M., Mediero, L., and Garrote, L. (2016). Optimization of hedging rules for reservoir operation during droughts based on particle swarm optimization. *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 15, pp. 5759-5778.

Tu, M.Y., Hsu, N.S., and Yeh, W.W.G. (2003). Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 129, No. 2, pp. 86-97.

Tu, M.Y., Hsu, N.S., Tsai, F.T.C., and Yeh, W.W.G. (2008). Optimization of hedging rules for reservoir operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 134, No. 1, pp. 3-13.

Wan, W., Zhao, J., Lund, J.R., Zhao, T., Lei, X., and Wang, H. (2016). Optimal hedging rule for reservoir refill. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 142, No. 11, 04016051-1-04016051-13.

Received	September 23, 2019
Revised	September 23, 2019
Accepted	October 7, 2019